

UNIVERSITÀ DI PISA
Scuola di Dottorato in Ingegneria "Leonardo da Vinci"



Corso di Dottorato di Ricerca in
INGEGNERIA DELL'INFORMAZIONE
TESI DI DOTTORATO DI RICERCA

MIXED-SIGNAL PLATFORMS FOR MEMS
AND MOEMS SENSOR CONDITIONING

Autore:

Ing. Emilio Volpi

Relatori:

Prof. Ing. Luca Fanucci

Prof. Ing. Roberto Saletti

Anno 2010

*Ai miei genitori
per il bene e il sostegno che mi avete dato
in ogni momento della mia vita*

Nunquam invenietur, si contenti fuerimus inventis.

SENECA, *Naturales Quaestiones*, 6, 5, 2.

Mai nulla si scoprirebbe, se ci tenessimo paghi delle cose scoperte.

Acknowledgements

Non è facile riuscire a ringraziare in modo adeguato tutte le persone che mi sono state vicino in tutti questi anni di Dottorato e che mi hanno aiutato a perseguire questo importante traguardo.

Grazie ai miei genitori e a mia sorella, per gli insegnamenti e i valori che mi avete dato. Grazie per avermi sempre voluto bene e per avermi aiutato a percorrere questo lungo e difficile percorso che è la vita. Grazie anche per tutto ciò che mi avete dato e che non mi rendo conto di aver avuto!

Un grazie di cuore a Laura per l'amore che prova per me e per essermi sempre stata vicina e per avermi aiutato sia nei momenti di gioia che nei momenti di difficoltà che ho avuto in questi anni. Grazie per la pazienza (non comune!) che ogni giorno hai, e che hai avuto, per me e per aver saputo ammorbidire i tratti a volte un po' "spigolosi" del mio carattere rendendomi una persona migliore.

Grazie a tutti voi per aver fatto di me la persona che sono!

Un ringraziamento ai miei tutori Prof. Luca Fanucci e Prof. Roberto Saletti per le opportunità di crescita professionale che mi hanno dato e per la loro amicizia.

Uno speciale ingraziamento va tutti i miei amici e in particolare a tutti i ragazzi della SensorDynamics AG di Navacchio (Pisa) con i quali ho trascorso i momenti più significativi (e impegnativi!) di questi tre anni di Dottorato, per le opportunità di crescita professionale che mi hanno dato e per avermi insegnato cosa significhi impegno e professionalità.

Il Ricordo di questa esperienza non svanirà nel tempo.

Emilio

Pisa, 26 Febbraio 2010

Contents

List of figures	III
List of tables	V
Sommario	VII
Abstract	IX
Introduction	XI
1 MEMS and MOEMS Devices	1
1.1 Introduction	1
1.2 MEMS history	2
1.3 MEMS Manufacturing technologies	2
1.3.1 Surface Micromachining	3
1.3.2 Bulk Micromachining	5
1.4 MEMS sensing and actuation technology	6
1.5 MEMS applications	9
1.5.1 Life Science applications	10
1.5.2 Communications: RF MEMS	12
1.5.3 Automotive	12
1.5.4 Commercial Applications	15
1.5.5 Industrial Applications	16
1.5.6 Military and Aero-space Applications	17
1.6 MOEMS applications	19
1.6.1 Display (DMD)	20
1.6.2 Spectrometers	22
1.6.3 IR sensors	22
1.6.4 Barcode Scanners	23
1.6.5 Head-Up Displays and Picoprojectors	23

2	Design methodologies for MEMS conditioning circuits	27
2.1	Specifications for sensor conditioning electronics	27
2.1.1	Sensor circuitry and related architectures	29
2.1.2	Temperature sensors	29
2.1.3	Pressure sensors	30
2.1.4	Angular and Linear position sensors	31
2.1.5	Angular rate sensors	32
2.1.6	Acceleration sensors	32
2.2	Technology and electronic design issues	33
2.3	Design methodologies	36
2.3.1	Universal Sensor interface	37
2.3.2	Platform based design	39
2.3.3	Limitations of the Platform Based Design	40
3	ISIF Platform	43
3.1	ISIF Application Space	44
3.1.1	Magneto-Resistive angular position sensors	45
3.1.2	Acceleration sensors	46
3.2	Platform Overview	47
3.2.1	Analog section	47
3.2.2	Digital Section	49
3.2.3	DSP Software Section	50
3.2.4	ISIF physical implementation	51
3.3	ISIF platform limits and its space application extension	52
3.3.1	Extension to flow sensor applications	53
3.3.2	Extension to laser-based video projection systems	53
3.3.3	The SD4K platform	54
4	Design of a PWM high-side driver with programmable output current for flow monitoring applications	55
4.1	Thermal flow sensors	57
4.1.1	Time of flight and calorimetric flow sensors	58
4.1.2	Anemometer type flow sensors	59
4.2	MAF sensor physical description	65
4.3	Design space exploration with ISIF and choice of driving algorithm	68
4.4	PWM High-side driver design	72
4.4.1	Principle of operation	73
4.4.2	Circuit description	78
4.4.3	Layout	80

4.4.4	Simulation and experimental results	80
5	SD4K platform	95
5.1	Aim of the SD4K platform	95
5.2	Micromirror devices	97
5.2.1	Digital micromirrors	98
5.2.2	Scanning micromirrors	100
5.3	SD4K application: Laser-based projection system	103
5.4	SD4K system study	106
5.5	Characteristics of the target Micromirror	106
5.5.1	Micromirror fabrication process	108
5.5.2	First development tests	110
5.5.3	Wafer level packaging	111
5.5.4	New micromirror design	115
5.5.5	Reflex-suppression	117
5.5.6	First results	122
5.6	Modelling and testing of the micromirror	122
5.6.1	Micromirror specifications	124
5.6.2	Electrostatic actuation of the micromirror	125
5.6.3	FEM Simulations	128
5.6.4	Test and characterization with ISIF flow	132
5.6.5	Simulink Model	137
5.6.6	Electrical Model	138
5.7	SD4K: Description and block diagram	139
5.7.1	Analog section	140
5.7.2	Digital section	143
6	Design of a high-voltage driver for the actuation of a dual-axis electrostatic scanning micromirror	149
6.1	High-voltage micromirror driver design	149
6.1.1	Micromirror driving architectural choices	150
6.1.2	High-Voltage driver top level definition	151
6.1.3	High-Voltage driver specifications	153
6.1.4	Circuit description	154
6.1.5	Sizing of devices	160
6.1.6	Simulation results	164
6.1.7	High-voltage Driver Layout	171
	Conclusions	173
	Bibliography	177

List of Publications

195
